

# 一种新型的认知无线电协作检测算法研究\*

孟令文,李方伟,朱江

(重庆邮电大学 移动通信技术重庆市重点实验室,重庆 400065)

**摘要:** 依据无线传感网络分簇协议,提出了一种算法。簇内采用能量自适应双门限检测,簇间通过 Beta 模型来并自动更新动态分配每一个簇头在数据融合中的权重因子,从而有效减小信任度较低的簇头对判决结果的影响,增强信任度较高的簇头参与度。理论分析和仿真结果表明,算法的复杂度和检测性能均优于传统的协作检测算法和分簇算法。

**关键词:** 协作检测;分簇协议;Beta 模型;权重因子

中图分类号: TP929.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)14-0061-04

## A new method of cooperative detections algorithms in cognitive radio

Meng Lingwen, Li Fangwei, Zhu Jiang

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Bases on the clustering protocol of wireless sensor networks, this paper proposes an algorithm. It uses double-threshold detection within the cluster, the Beta model for updating the credit level and allocates dynamically to each cluster with head weight data fusion factor as early possible, weakening the judgment of the lower cluster head of the trust, strengthen the trust cluster head participation. Theoretical analysis and simulation results show that, the improved clustering algorithm is better than both traditional cooperative detection and traditional clustering cooperative spectrum sensing algorithm in the complexity of the algorithm and the detection performance.

**Key words:** collaborative detection; clustering protocol; Beta model; weighting factor

协作频谱检测利用空间分集的优势,可以有效提高系统的检测性能,但同时面临两个问题:(1)在次用户较多的情况下,若所有的次用户均参与协作检测,则基站需要花费大量的时间和带宽来处理判决数据,而实际可用信道带宽却是有限的;(2)实际无线通信环境中,每个次用户所处的无线通信环境具有差异性,部分次用户有可能把不准确的判决结果传送到融合中心,从而影响了它对主用户的最终判决。为解决上述两个问题,本文将无线传感器网络 WSN(Wireless Sensor Networks)分簇机制引入协作检测中。

目前,分簇机制主要应用在 WSN 的研究中<sup>[1]</sup>。无线传感器网络由传感器节点、基站和管理节点组成,与认知无线网络 CRN(Cognitive Radio Networks)具有很多相似点:均注重节点的能量和通信消耗问题;都是以数据融

合为核心的网络;网络都具有自组织性。因此,在传统的协作检测过程中可以利用分簇机制将认知无线网络划分为若干簇的集合再进行协作检测。

### 1 簇的协作检测模型

在 WSN 体系结构中,从网络拓扑结构角度可以把它分为两类:平面路由协议和分簇路由协议,本文主要讨论后一种。在该协议中,WSN 通常被划分为多个簇,每个簇由一个簇头和多个簇内成员构成,簇头负责管理和控制簇内成员,并负责对簇内成员数据收集、融合并转发;低一级网络的簇头构成高级网络中的簇内成员,簇头节点之间通过单跳或多跳的方式与最高层簇头基站进行通信。

为了充分利用有限的频谱资源,提高协作检测的准确性和可靠性,首先要对认知无线网络进行分簇处

\* 基金项目:国家自然科学基金项目(61102062);重庆市科委自然科学基金项目(cstc2011jjA1192);重庆市教委科学技术研究项目(KJ110503);重庆邮电大学博士启动基金项目(A2010-11)

# 网络与通信 Network and Communication

理<sup>[2]</sup>。如图 1 所示,假设共有  $N$  个次用户组成一个 CRN 网络,并划分为  $L$  个簇,其中簇  $i$  内次用户数用  $N_i$  表示,簇头用  $CH_i$  表示,则有  $\sum N_i=N, \sum CH_i=L$ ,其中  $i=1, 2, \dots, L$ 。

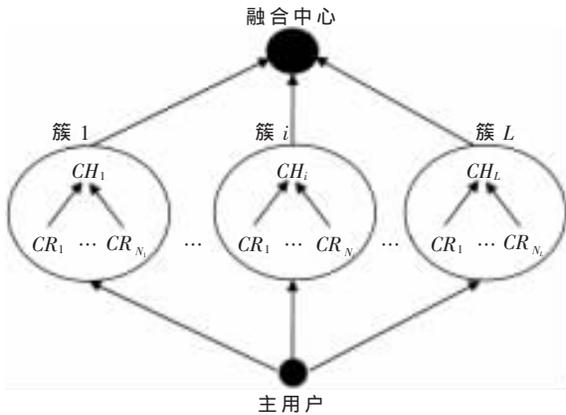


图 1 基于簇的协作感知模型

## 2 基于分簇的协作感知算法

本文重点研究簇内检测的能量自适应双门限检测和簇间检测的动态信任度加权的问题,限于篇幅不讨论簇的形成过程。

### 2.1 簇内检测

许多文献已证实,自适应双门限检测算法比传统的单门限检测算法性能要好,本文就双门限能量检测算法做简要论述。双门限检测原理图如图 2 所示。



图 2 双门限检测原理图

针对双门限中间不判决区域,当参与协作检测的用户数目较大时,只选择了具有能够判决的认知用户参与簇头的融合<sup>[3]</sup>,但是当次用户数目较少时,会丢失一部分有用的信息,导致检测性能下降。通过仿真实证:在次用户较多的情况下,控制信道传输数据至少节省 50% 以上。任意选取簇  $i$  为例,则第  $j$  个次用户检测概率和虚警概率分别为:

$$P_{d,i,j} = Pr(Y > \lambda_2 | H_1) = Q \left( \left[ \frac{\lambda_2}{\sigma_n^2} - \gamma_i - 1 \right] \sqrt{\frac{N}{2\gamma_i + 1}} \right) \quad (1)$$

其中  $i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, k_L$ 。

$$P_{f,i,j} = Pr(Y > \lambda_1 | H_0) = Q \left( \left[ \frac{\lambda_1}{\sigma_n^2} - 1 \right] \sqrt{N} \right) \quad (2)$$

其中  $i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, k_L$ 。

由式(2)可得:

$$\lambda_{1i} = \left[ \frac{Q^{-1}(P_{f,i,j})}{\sqrt{N}} + 1 \right] \sigma_n^2 \quad (3)$$

其中  $\Delta\lambda_i = \lambda_{1i} - \lambda_{2i}$ 。

所以:

$$P_{d,i,j} = Q \left( \left[ Q^{-1}(P_{f,i,j}) + \frac{\Delta\lambda_i}{\sigma_n^2} \sqrt{N} - \gamma_i \sqrt{N} \right] \sqrt{\frac{1}{2\gamma_i + 1}} \right) \quad (4)$$

其中  $i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, k_L$ 。

假设簇  $i$  虚警概率为  $P_{f,i}$ ,则在恒虚警(CFAR)条件下,簇  $i$  的次用户  $j$  的次用户的虚警概率为:

$$P_{f,i,j} = 1 - k_L \sqrt{1 - P_{f,i}} \quad i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, k_L \quad (5)$$

式(5)代入式(4)可得:

$$P_{d,i,j} = Q \left( \left[ Q^{-1}(1 - k_L \sqrt{1 - P_{f,i}}) + \frac{\Delta\lambda_i}{\sigma_n^2} \sqrt{N} - \gamma_i \sqrt{N} \right] \sqrt{\frac{1}{2\gamma_i + 1}} \right) \quad (6)$$

其中  $i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, k_L$ 。

OR 准则下感知网络的簇  $i$  的检测概率为:

$$P_{d,i} = 1 - \prod_{i=1}^{k_L} \left[ 1 - Q \left( \left[ Q^{-1}(1 - k_L \sqrt{1 - P_{f,i}}) + \frac{\Delta\lambda_i}{\sigma_n^2} \sqrt{N} - \gamma_i \sqrt{N} \right] \sqrt{\frac{1}{2\gamma_i + 1}} \right) \right] \quad (7)$$

其中  $i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, k_L$ 。

### 2.2 簇间基于簇加权的协作感知算法

#### 2.2.1 Beta 信任度模型的建立

考虑路径损耗和衰落对感知结果的影响,本文提出了一种基于 Bate 信任模型的集中式簇的协作感知方案。通过评估各个簇头的信任度来对其加权,依据每一个簇头判决行为与基站判决是否一致进行下一时隙参数更新,从而避免了当前行为的信任值计算的复杂性,解决了动态信任值计算问题。由于各个簇头的信任值在  $[0, 1]$  随机性分布,根据参考文献[4]的研究成果,可以看出其概率分布符合 Beta 分布。概率表达式:

$$f(\alpha, \beta) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \quad (8)$$

其中  $B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx, 0 < x < 1, \alpha > 0, \beta > 0$ 。

用  $\theta$  表示某一个时间发生的概率,则:

$$\theta \approx \text{Beta}(\alpha, \beta) \quad (9)$$

由上面的两个式子可以得到:

$$f(\theta|\alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \theta^{\alpha-1} (1-\theta)^{\beta-1} \quad (10)$$

其中  $0 \leq \theta \leq 1$ , 且若  $\alpha \neq 1$  则  $\theta \neq 0$ ; 若  $0 < \beta < 1$  则  $\theta \neq 1$ 。若已知事件之前成功的次数为  $s$ ,失败的次数为  $f$ ,那么在 Beta 分布中,有  $\alpha = s + 1, \beta = f + 1$ 。 $\theta$  的数学期望为:

$$E(\theta) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (11)$$

#### 2.2.2 Beta 信任度的合成

(1)直接信任度:基站(BS)保存簇头  $CH_i (i=1, 2, \dots, L)$  的信任度  $\Theta_{BS \rightarrow i} = B(\alpha_i + 1, \beta_i + 1)$ ,初始化  $\alpha_i = \beta_i = 0$ ,假设在时间  $t$  内,基站(BS)和各个簇头交互为  $s+f$  次数,其中成功  $s$  次,失败  $f$  次,则基站(BS)更新簇头  $CH_i (i=1, 2, \dots, L)$  的信任度为:

# 网络与通信

Network and Communication

$$\Theta_{BS \rightarrow i}^i = B(\alpha_i + s + 1, \beta_i + f + 1) \quad (12)$$

(2)间接信任度:假设基站(BS)从簇头  $SU_k(k=1, 2, \dots, L, k \neq i)$ 处获得簇头  $CH_i(i=1, 2, \dots, L)$ 的信任度  $(\alpha_i^k, \beta_i^k)$ , 基站(BS)簇头  $CH_i, CH_k(i \neq k)$ 的信任信息  $B(\alpha_i, \beta_i)$ 和  $B(\alpha_k, \beta_k)$ ,将这些信息结合就可以算出最终的簇头  $CH_i(i=1, 2, \dots, L)$ 的信任度,基站得到总的信任度统计量:

$$\alpha_i^{\text{new}} = \alpha_i + \frac{2\alpha_k \times \alpha_i^k}{(\beta_k + 2)(\alpha_i^k + \beta_i^k + 2) + 2\alpha_k} \quad (13)$$

$$\beta_i^{\text{new}} = \beta_i + \frac{2\beta_k \times \beta_i^k}{(\beta_k + 2)(\alpha_i^k + \beta_i^k + 2) + 2\alpha_k} \quad (14)$$

$$T_{BS \rightarrow i}(n) = E(\text{Beta}(\alpha_i^{\text{new}} + 1, \beta_i^{\text{new}} + 1)) = \frac{\alpha_i^{\text{new}} + 1}{\alpha_i^{\text{new}} + \beta_i^{\text{new}} + 2} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \alpha_i^{\text{new}} = \alpha_i^{\text{old}} + s_n \\ \beta_i^{\text{new}} = \beta_i^{\text{old}} + s_n - 1 \end{cases} \quad (16)$$

式中,若簇头的判决结果与基站最终判决结果一致,则  $s_n=0$ ,否则  $s_n=1$ ,该簇头判断错误的的可能性比较大。

### 2.2.3 系统融合及判决

在基站(BS)处,各个簇头将簇内的融合结果分配不同的权重因子  $T_{BS \rightarrow i}(n)$ ,为了最大保护主用户不被干扰,采用基于“或”加权的合并准则。可以得出融合中心的虚警概率  $Q_d(n)$ 和检测概率  $Q_d(n)$ 的表达式<sup>[5]</sup>:

$$Q_f(n) = 1 - \prod_{i=1}^L (1 - P_{fi}(n)) \quad (17)$$

$$Q_d(n) = 1 - \prod_{i=1}^L T_{BS \rightarrow i}(n)(1 - P_{di}(n)) \quad (18)$$

## 3 算法与仿真分析

### 3.1 算法流程

基于 Beta 模型的簇的加权协作感知过程如下:

(1)依据 WSN 中分簇协议把整个认知无线网络区域分为  $L$  个簇,假定每一个簇是恒虚警(CFAR)的,且每一个认知用户的信噪比是已知的;

(2)对任意一个分簇网络按照集中式协作检测进行协作检测,由于无线环境的相似性,假定簇内各个感知节点具有相同的双门限,进行簇内普通节点的判决,将判决结果传到簇头,簇头最终融合后生成一个判决结果;

(3)初始化 Beta 函数中的  $\alpha_i = \beta_i = 0$ ,分配给所有簇头初始权重因子  $T_{BS \rightarrow i}(1) = 1/2, i=1, 2, \dots, L$ ;

(4)基站(BS)收集所有簇头的判决信息和信任度因子,依据某种融合准则做出主用户是否存在的判断;

(5)判断该轮是否结束,若结束,则转回步骤(1)进行新一轮的分簇检测;否则,转到步骤(6);

(6)基站(BS)把对主用户的判决结果( $H_0|H_1$ )反馈到每一个簇头,各个簇头按照式(15)和式(16)进行下一时隙的信任度函数更新,转到步骤(2)、(4)、(5),进行该轮的下一时隙的检测。

### 3.2 仿真与分析

下面就簇内采用双门限(DOUBLE)检测进行仿真。仿真参数: $N=1, 15, 30, TW=3, \bar{\gamma}_{\text{dB}}=-3$  dB,信道环境为 AWGN 信道,噪声功率  $\sigma_w^2=1$ 。通过分析如图 3 双门限检测性能与用户数之间的关系,可以看出,对于用户数  $N=15$  和  $N=30$  的两种情况下协作检测性能来说,在采用相同的 OR 融合准则下,双门限检测的性能明显高于传统采用单门限检测的融合方法,这主要是因为传统的单门限检测在门限值处容易误判,双门限把这个容易误判的区域直接丢弃,选择了有用的判决信息,减少了不可靠的判决信息对全局检测性能的影响。同时,随着平均信噪比(反映信道环境的优劣)或者用户数的增加,系统的检测性能逐渐增加。但是在增加用户数的同时,要考虑系统检测性能和系统开销、控制带宽的需求进行折中。

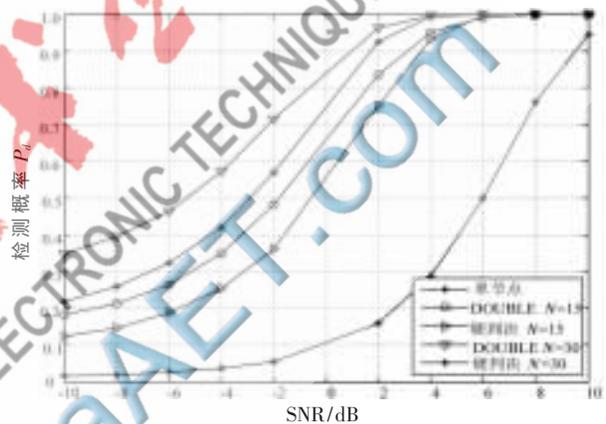


图 3 协作用户数与检测性能的关系

对于基于簇的 CRN 网络的仿真,在 AWGN 环境下进行,簇内采用双门限检测,簇间采用基于 Beta 模型的动态加权簇的协作方法,簇内和簇间均使用相同的 OR 准则,参数设置:带宽时延积  $m=4$ ,感知次用户数  $N=36$ ,簇数  $L=3$ ,各次用户的信噪比分别为  $-8$  dB~ $-17$  dB 随机分布。从图 4 可以看出,在相同的虚警概率  $P_f$  下,本文所提出的方案最优,传统的簇融合次之,传统的 OR 融合最差,最后曲线趋于汇合,这是由于基于簇权重的融

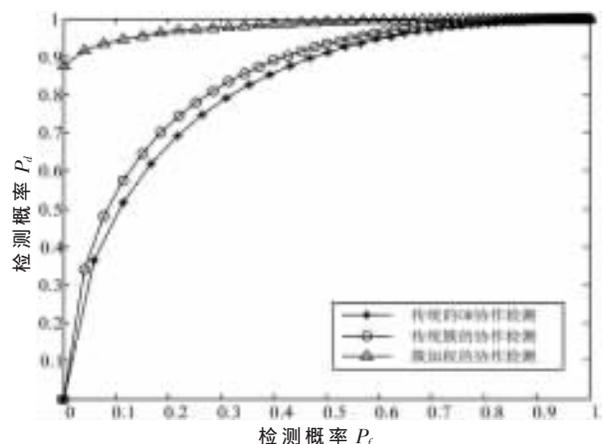


图 4 三种协作检测方法性能比较

## 网络与通信 Network and Communication

合方法随着判决次数的增加,各个簇头的权重因子乘积逐渐靠近 1,逐渐退化成传统的簇协作检测的缘故。同时,系统虚警概率越低,该方法表现的性能越好。从而证实了本文所提方案的优越性。在协作过程中,簇头向融合中心发送判决数据,这样大大减少了传输数据所有的带宽,这在控制带宽有限的条件下是很有意义的。

本文针对单用户的局限性和在多用户的协作检测的带宽受限性,把 WSN 中分簇算法并引入到协作频谱检测中,提出一种自适应能量双门限检测和簇的动态加权的联合检测算法,并对融合方案和性能分析进行详细的论述和设计。通过理论分析和仿真验证,无论是与簇内的传统硬判决 OR 准则的协作检测还是与簇间的传统的簇的协作检测算法比较,本文所提出的基于 Beta 模型的动态加权簇的协作检测性能均优于两者,利用此方法,无线感知网络可以获得更高的检测性能。

### 参考文献

- [1] 陈硕.无线传感器网络几个关键技术的研究[J].舰船电子工程,2007,27(5):17-19.
- [2] Bai Zhiqian, Wang Li, Zhang Haixia, et al. Cluster-based

cooperative spectrum sensing for cognitive radio under bandwidth constraints[C].12th IEEE International Conference on Communication Systems 2010, Cape Town, 2010:569-573.

- [3] Hong Li, Ma Junfei, Xu Fangmin, et al. Optimization of collaborative spectrum sensing for cognitive radio[C].IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2008:1730-1733.
- [4] 冯键昭,肖德琴,杨波.基于  $\beta$  分布的无线传感网络信誉系统[J].计算机应用,2007,27(1):111-117.
- [5] 吕春英,沈国勤,袁誉红,等.基于簇加权的协作频谱感知算法[J].探测与控制学报,2012,34(2):72-76.

(收稿日期:2013-03-21)

### 作者简介:

孟令文,男,1981年生,硕士研究生,主要研究方向:认知无线电。

李方伟,男,1960年生,博士,教授,主要研究方向:移动通信技术与理论、组网技术、信息安全技术、信号处理和智能天线技术。

朱江,男,1977年生,博士,副教授,主要研究方向:认知无线电。